色氨酸的生理功能及其在畜禽饲粮中的应用

李华伟[1,2]　祝　倩[1]　吴灵英[2]　印遇龙[1]　孔祥峰[1*]

（1.中国科学院亚热带农业生态研究所，中国科学院亚热带农业生态工程重点实验室，长沙 410125；2.武汉轻工大学，动物科学与营养工程学院，武汉 430023）

摘　要：色氨酸作为一种功能性必需氨基酸，可提高动物生长性能、调节采食与泌乳、增强机体抗氧化和免疫功能等。色氨酸作为饲料添加剂应用于低蛋白质饲粮中，在保证动物正常生产性能情况下，可减少蛋白质饲喂量，缓解蛋白质饲料原料紧缺问题，减轻养殖废弃物对环境造成的污染。本文从色氨酸的理化性质、代谢途径及其对畜禽的生理功能等方面进行综述，为色氨酸在畜牧生产中的科学合理应用提供参考。

关键词：色氨酸；代谢途径；生理功能；畜禽；调控

中图分类号：S816.7　　文献标识码：A　　文章编号：1006-267X(2016)00-0000-00

近年来，快速发展的规模化、集约化畜禽养殖业面临着饲料资源短缺、动物机体健康和产品安全以及养殖环境污染严重等突出问题。随着国内外动物营养学研究的深入和饲料加工业的迅速发展，低蛋白质氨基酸平衡饲粮的推广与应用可在一定程度上缓解上述问题[1]。色氨酸（tryptophon，Trp）作为一种必需氨基酸，通常是仔猪饲粮中继赖氨酸、苏氨酸和蛋氨酸后的第 4 个限制性必需氨基酸，在仔猪玉米–豆粕型饲粮中又通常被称为第二或第三限制性氨基酸。色氨酸不仅参与体内蛋白质的合成，还是生成血管紧张素、5–羟色胺（5-HT）、烟酸、褪黑激素、色胺、辅酶Ⅰ（NAD）和辅酶Ⅱ（NADP）等的前体物质，具有多种生物活性。例如，色氨酸及其代谢产物在动物采食、抗应激、免疫反应、抗氧化和泌乳等方面均发挥着重要调节作用。在规模化畜禽养殖过程中，有效利用色氨酸，不仅有利于提高动物的生产性能和健康水平，还可提高动物产品的品质、缓解蛋白质饲料资源紧缺和养殖废弃物造成的环境污染等问题。本文从色氨酸的理化特性、畜禽体内的代谢途径及其对畜禽生理功能的调控等方面进行综述，为色氨酸在畜牧业生产中的科学合理推广与应用提供参考。

1　色氨酸在畜禽体内的代谢通路

1.1　来　源

收稿日期：2015－09－24

基金项目：国家 973 计划课题（2012CB124704）；国家自然科学基金项目（31270044）；中科院“西部之光”人才培养计划重点项目；中国工程院咨询研究项目（2015-XY-41）

作者简介：李华伟（1989－），男，河南周口人，硕士研究生，从事猪营养生理研究。E-mail: zhenlihuawei@126.com

*通信作者：孔祥峰，研究员，硕士生导师，E-mail: nnkxf@isa.ac.cn

色氨酸是一种特殊的动物必需氨基酸，是机体内唯一通过非共价键与血清白蛋白结合的氨基酸，可广泛参与蛋白质和核酸的合成。由于动物不能合成色氨酸，机体内的色氨酸只能由机体组织蛋白质分解产生（约占 2/3），或者从饲粮中消化吸收获得（约占 1/3）。由《中国饲料成分及营养价值表》（2014 年第 25 版）可见，不同常规饲粮原料中色氨酸的含量各异（表 1），富含色氨酸的饲粮原料主要是一些高蛋白质饲粮原料如血粉、大豆、花生和鱼粉等，而玉米、大麦、小麦和米糠等一些谷物籽实及其副产品中的色氨酸含量则较低。此外，饲料添加剂中的色氨酸也是饲粮中色氨酸的主要来源。

表 1 常规饲粮原料中色氨酸含量

Table 1 The tryptophan content in common feedstuffs %

原料 Ingredients	含量 Content	原料 Ingredients	含量 Content
玉米 Corn	0.07	大豆粕 Soybean meal	0.65
小麦 Wheat	0.15	大豆饼 Soybean cake	0.64
大麦 Barley	0.15	花生粕 Peanut meal	0.45
高粱 Sorghum	0.08	花生饼 Peanut cake	0.42
稻谷 Paddy	0.10	菜籽粕 Rapeseed meal	0.43
糙米 Rough rice	0.12	菜籽饼 Rapeseed cake	0.40
麦麸 Wheat bran	0.20	棉籽粕 Cottonseed meal	0.35
米糠 Rice bran	0.14	棉籽饼 Cottonseed cake	0.37
葵花籽粕 Sunflower meal	0.37	国产鱼粉 Domestic fish meal	0.70
葵花籽饼 Sunflower cake	0.28	羽毛粉 Feather meal	0.40
芝麻籽饼 Sesame cake	0.40	肉骨粉 Meat and bone meal	0.26
苜蓿草粉 Alfalfa meal	0.37	血粉 Blood meal	1.11

1.2 代谢途径

色氨酸在动物体内主要存在 2 条代谢途径（图 1）。一是 5-HT 代谢途径，其主要发生在胃肠道，色氨酸由肠嗜铬细胞内的色氨酸羟化酶催化生成 5–羟基色氨酸，又由 5–羟基色氨酸脱羧酶催化脱去 CO_2 生成 5-HT；另一条途径是复杂的犬尿氨酸代谢途径，色氨酸由吲哚胺 2,3–双加氧酶或色氨酸 2,3–双加氧酶催化生成犬尿氨酸，又经复杂的代谢过程生成犬尿喹啉酸、黄尿酸和喹啉酸。

色氨酸羟化酶 TPH1 亚型存在于肠嗜铬细胞中，可将色氨酸转化成血清素，而血清素作

为主要的神经介质可参与动物肠道的免疫、蠕动和分泌过程。由于饲粮中的色氨酸主要在小肠中被转化为血清素，所以胃肠道中含有机体 80%～90%的血清素。此外，由于吲哚胺 2,3–双加氧酶或色氨酸 2,3–双加氧酶主要存在于肝脏中，所以色氨酸转化为犬尿氨酸主要在胃肠道和肝脏中进行。色氨酸经过犬尿氨酸途径主要产生喹啉酸，喹啉酸可进一步代谢生成烟酸或烟酰胺。

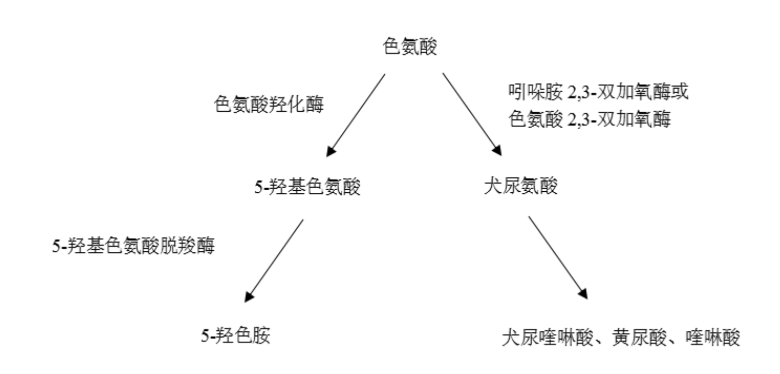


图 1　色氨酸代谢途径

Fig.1　Metabolic pathway of tryptophan

2　色氨酸在畜禽体内的生理功能

2.1　免疫功能

色氨酸与畜禽机体的免疫功能密切相关。例如，在猪发生慢性肺炎时，其血浆色氨酸水平逐渐降低[2]；在饲粮中添加 0.04％的 *L*–色氨酸可显著提高蛋雏鸭的脾脏指数，添加 0.06％的 *L*–色氨酸可显著提高其胸腺指数[3]；在鸡饲料中添加 *L*–色氨酸可显著提高干扰素和免疫球蛋白 G（IgG）的水平，显著增强机体对传染性法氏囊病的免疫保护[4]；在饲粮中添加 0.05％的 *L*–色氨酸，可显著增加蛋鸭的胸腺、法氏囊和脾脏等免疫器官的重量[5]；在饲粮中添加 *L*–色氨酸，可显著提高扬州鹅的脾脏指数，并通过刺激 IgG 和免疫球蛋白 M（IgM）分泌提高其体液免疫能力[6]。由上可以推断，当发生炎症反应时机体对色氨酸的需要量增加，色氨酸的分解代谢增强；在饲粮中添加一定剂量的色氨酸有助于畜禽免疫器官的发育，提高机体免疫力。

色氨酸代谢产生的 5-HT、N–乙酰血清素和褪黑色素，可通过清除自由基来阻止核转录因子 kappa B（NF-κB）的入核从而抑制肿瘤坏死因子–α（TNF-α）产生，进而增强机体的免疫功能。另外，N－乙酰血清素可通过调节一氧化氮合酶而影响诱导型 NO 合成，从而调节机体免疫功能。色氨酸分解代谢可促进骨髓 T 淋巴细胞前体分化为成熟的 T 淋巴细胞，T 淋巴细胞的分化和代谢产物对 B 淋巴细胞的成熟又具有重要作用，进而影响 B 淋巴细胞分泌 IgG 的能力[7]。

2.2　抗氧化功能

近年来的一些报道表明，色氨酸与机体的抗氧化功能存在一定联系。马玉娥等[8]在饲粮中添加 0.18%的色氨酸可提高黄羽肉种鸡血清中超氧化物歧化酶（SOD）活性和谷胱甘肽（GSH）含量，显著提高血清中谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性。刘肖挺等[9]研究发现，在饲粮中添加一定剂量的色氨酸，可提高肝脏中 SOD 和 GSH-Px 活性，显著降低血清中丙二醛（MDA）含量。色氨酸抗氧化的机制是其分子中的氨基可与氧化剂结合，阻碍氧化反应的发生，从而降低血清中 MDA 含量。另外，Raju 等[10]给大鼠饲喂色氨酸缺乏饲粮，发现肝脏中 GSH-Px 活性降低。Lambertucci 等[11]指出，大鼠体内抗氧化酶活性的提高，可能是由肌肉中抗氧化酶的 mRNA 表达上调引起的。色氨酸是否能够调节肌肉中抗氧化酶的 mRNA 表达和活性，进而影响机体的抗氧化功能，还有待于进一步研究。

色氨酸的抗氧化功能还与褪黑激素有关。褪黑激素是一种广泛分布的多功能激素，其抗氧化功能已被很多研究证实。褪黑素本身是富含电子的芳香族吲哚环，可以与亲电子自由基反应，清除多种自由基，起到抗氧化作用。另外，褪黑激素被氧化后形成的环型 3－羟基硫酸褪黑素、6－羟基硫酸褪黑素及 N－乙酰基－N－甲酰基－5－甲氧基脲胺等各级代谢产物也具有抗氧化能力。这些代谢产物主要是通过提供自由电子清除活性氧，或者增强 SOD 和 GSH-Px 活性来抑制机体的过氧化反应。

2.3　采食量调控

韩旭峰等[12]研究发现，随着饲粮中 *L*－色氨酸添加量的增加，1～14 日龄北京鸭的日采食量呈先升高后降低趋势，并且在添加量为 0.202％时效果最佳。王荣发等[13]认为，低蛋白质饲粮中可消化 *L*－色氨酸含量为 0.146％时，试验猪表现出最佳的生长性能，但 *L*－色氨酸含量超过 0.152％时，试验猪的生长性能则呈降低趋势。以上研究表明，增加色氨酸的添加量可提高家禽和猪的采食量，但过量的 *L*－色氨酸则会降低其采食量，从而抑制机体的生长。色氨酸可能通过以下 2 种途径影响动物的采食量：

第一，通过影响脑中神经递质 5-HT 的含量来影响动物的采食量。色氨酸与大分子中性氨基酸（LNAA）的比例会影响动物的采食量。增加饲粮中的色氨酸含量，可提高血液中游离色氨酸的浓度，从而提高血液中游离色氨酸与 LNAA 的比例。同时，还会使通过血脑屏障的色氨酸增加，而色氨酸在脑中经氧化和脱羧作用生成 5-HT 和多巴胺等，脑中 5-HT 对动物的食欲有抑制作用。

第二，通过调控胃肠调节肽——胃饥饿素（ghrelin）的分泌来影响动物的采食量。Zhang 等[14]研究发现，仔猪采食低水平色氨酸（0.13％）饲粮，只有口服色氨酸才能提高其采食量

和血清中 ghrelin 浓度，而静脉灌注色氨酸则对采食量和血清中 ghrelin 浓度没有影响，这说明色氨酸促进仔猪采食是通过胃肠道发挥作用的。此外，色氨酸还能显著促进胃和十二指肠中 ghrelin 基因的表达，进一步表明色氨酸促进仔猪采食和生长速度的作用可能是通过促进胃肠黏膜中 ghrelin 的表达和分泌来实现的。

由上可见，色氨酸可通过 5-HT 和 ghrelin 调节动物采食。然而，不论是口服还是静脉灌注，5-HT 都可降低仔猪采食量，但不影响血清 ghrelin 浓度，提示色氨酸调节动物采食量的 5-HT 和 ghrelin 途径是相互独立的。色氨酸对动物采食量的影响是 2 种途径综合作用的结果。另外也有报道指出，色氨酸对采食量的调节是由于 5-HT 与不同受体结合综合表现出的结果，如 5-HT 与 5-HT_{1A} 受体结合时，能促进采食，5-HT 与 5-HT_{2C} 受体结合可以抑制采食[15]。上述的色氨酸调控动物采食量的各途径之间是否存在一定的关系，还需要进一步确认。

2.4　泌乳功能

泌乳母猪的氨基酸摄取可直接影响其乳腺发育和乳汁分泌，因此理想氨基酸模式对于泌乳母猪获得最大生产性能极其重要。Paulicks 等[16]研究发现，随饲粮中色氨酸添加量的增加，泌乳母猪的产奶量和仔猪日增重呈先增加后降低的趋势，可是乳中的乳脂和乳蛋白质含量并无显著变化，色氨酸添加量为 1.9 g/kg 时泌乳母猪达到最佳的生长繁殖性能。另外，由于动物为了维持机体自身需要可动员体内储备，因此乳中的乳脂和乳蛋白质含量不受色氨酸添加量的影响。有些研究还发现，苏氨酸和缬氨酸等氨基酸缺乏，可导致泌乳母猪产奶量和仔猪断奶重的降低[17-18]。但关于色氨酸对动物泌乳功能的影响研究较少，且其影响机制还有待进一步研究。

2.5　其他方面的生理功能

有报道称，在饲粮中添加色氨酸可显著降低小鼠血清中尿素和胆固醇含量，显著增加小肠绒毛高度和绒毛高度与隐窝深度的比值以及血清甘氨酸含量[19]。阮征等[20]报道，色氨酸及其犬尿氨酸代谢对猪和鼠的母－胎界面免疫调节具有一定的积极影响，对于提高母畜的繁殖性能具有重要作用。在保证仔猪饲粮赖氨酸需要条件下添加色氨酸，可降低饲粮中粗蛋白质的水平。在饲粮中添加色氨酸，还可提高饲粮蛋白质的消化吸收率，增加机体内氮的存留率，减少粪便中含氮代谢物的排放，从而减轻养殖废弃物对环境造成的污染。

另外，在饲粮中添加色氨酸对猪具有镇静作用，可减轻其应激反应。Koopmans 等[21]在饲粮中添加 0.5%的 *L*－色氨酸后，发现猪的挑衅行为减少，趴卧时间增多，断奶仔猪混群后的争斗和挑衅等应激行为明显降低。刘化伟等[22]在饲粮中添加色氨酸，可以使仔猪唾液中的皮质醇含量显著降低，仔猪间斗争的时间和次数显著减少。

3 小 结

色氨酸是一种重要的必需氨基酸，在饲粮中适量添加可增加动物的采食量和泌乳量，增强机体的免疫和抗氧化功能，提高机体对蛋白质的消化利用率，减轻动物的应激行为，缓解养殖废弃物对环境的污染等。但过量添加色氨酸则不会产生明显的效果，有时还会产生一定的负作用。关于色氨酸调节动物泌乳性能的机制以及色氨酸对母畜生长性能和繁殖性能的影响，由于研究妊娠动物的生理功能及免疫调控比较困难，所以还需要进一步深入研究。在畜禽养殖生产中，只有综合考虑畜禽的品种、性别、生长阶段、饲料配方和养殖环境等因素，科学合理地选择色氨酸的适宜添加量和添加时间，才能取得显著的养殖效益，而掌握色氨酸的理化性质以及在动物机体中代谢途径及生理功能，是科学合理利用色氨酸的基础。

参考文献：

[1] 印遇龙,孔祥峰,李铁军.新世纪我国畜禽养殖业面临的主要问题及应对措施[J].饲料工业,2007,28(14):1–5.

[2] 孔祥峰,印遇龙,伍国耀.猪功能性氨基酸营养研究进展[J].动物营养学报,2009,21(1):1–7.

[3] 刘肖挺,王安,杨小然,等.色氨酸对蛋雏鸭生长性能和营养物质代谢影响[J].中国饲料,2012(19):22–25.

[4] EMADI M,JAHANSHIRI F,KAVEH K,et al.Nutrition and immunity:the effects of the combination of arginine and tryptophan on growth performance,serum parameters and immune response in broiler chickens challenged with infectious bursal disease vaccine[J].Avian Pathology,2011,40(1):63–72.

[5] 张恬,王安,刘洋景.12~17 周龄金定蛋鸭色氨酸适宜需要量的研究[J].饲料工业,2011,32(20):6–9.

[6] 魏宗友,王洪荣,潘晓花,等.饲喂方式和饲粮色氨酸水平对扬州鹅免疫功能及抗氧化指标的影响[J].动物营养学报,2012,24(12):2356–2365.

[7] FALLARINO F,GROHMANN U,YOU S,et al.The combined effects of tryptophan starvation and tryptophan catabolites down-regulate T cell receptor ζ-chain and induce a regulatory phenotype in naive T cells[J].The Journal of Immunology,2006,176(11):6752–6761.

[8] 马玉娥,占秀安,朱巧明,等.饲粮色氨酸水平对黄羽肉种鸡生产性能、抗氧化功能及血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2011,23(12):2177–2182.

[9] 刘肖挺,王安,刘小然,等.色氨酸对蛋雏鸭生长性能、抗氧化功能及免疫器官发育的影响[J].饲料工业,2012,33(10):5–8.

[10] RAJU T N,KANTH V R,REDDY P U.Influence of kynurenines in pathogenesis of cataract formation in tryptophan-deficient regimen in *Wistar rats*[J].Indian Journal of Experimental Biology,2007,45(6):543–548.

[11] LAMBERTUCCI R H,LEVADA-PIRES A C,ROSSONI L V,et al.Effects of aerobic exercise training on antioxidant enzyme activities and mRNA levels in soleus muscle from young and aged rats[J].Mechanisms of Ageing and Development,2007,128(3):267–275.

[12] 韩旭峰,高玉鹏,候水生,等.1~14 日龄北京鸭色氨酸需要量的研究[J].中国饲料,2009(22):22–23,27.

[13] 王荣发,李敏,贺喜,等.低蛋白质饲粮条件下生长猪对色氨酸需要量的研究[J].动物营养学报,2011,23(10):1669–1676.

[14] ZHANG H W,YIN J D,LI D F,et al.Tryptophan enhances ghrelin expression and secretion associated with increased food intake and weight gain in weanling pigs[J].Domestic Animal Endocrinology,2007,33(1):47–61.

[15] 徐建,陈芳琴,郑德兴,等.色氨酸对动物采食的调控[J].饲料研究,2013(1):21–24.

[16] PAULICKS B R,PAMPUCH F G,ROTH-MAIER D A.Studies on the tryptophan requirement of lactating sows.Part 1:Estimation of the tryptophan requirement by performance[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2006,90(11/12):474–481.

[17] COOPER D R,PATIENCE J F,ZIJLSTRA R T,et al.Effect of nutrient intake in lactation on sow performance: determining the threonine requirement of the high-producing lactating sow[J].Journal of Animal Science,2001,79(9):2378－2387.

[18] RICHERT B T,TOKACH M D,GOODBAND R D,et al.Valine requirement of the high-producing lactating sow[J]. Journal of Animal Science,1996,74(6):1307－1313.

[19] RUAN Z,YANG Y H,WEN Y M,et al.Metabolomic analysis of amino acid and fat metabolism in rats with *L*-tryptophan supplementation[J].Amino Acids,2014,46(12):2681–2691.

[20] 阮征,印遇龙,伍国耀.色氨酸对哺乳动物母－胎界面的免疫调节作用及其机制[J].动物营养学报,2014,26(10):2986–2991.

[21] KOOPMANS S J,RUIS M,DEKKER R,et al.Surplus dietary tryptophan reduces plasma cortisol and noradrenaline concentrations and enhances recovery after social stress in pigs[J].Physiology & Behavior,2005,85(4):469–478.

[22] 刘化伟,石宝明,娄蕾,等.饲粮中添加色氨酸对仔猪混群后行为及相关激素的影响[J].中

国农业科学,2012,45(12):2455–2461.

Physiological Function and Dietary Application of Tryptophan in Livestock and Poultry

LI Huawei[1,2] ZHU Qian[1] WU Lingying[2] YIN Yulong[1] KONG Xiangfeng[1*]

(1. *Key Laboratory for Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China;* 2. *College of Animal Science and Nutritional Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan* 430023, *China*)

Abstract: Tryptophan, as a functional essential amino acid, plays important roles in improving growth performance, modulating feed intake and lactation, enhancing anti-oxidative and immune functions, and so on in animals. When used as a dietary additive to a low-protein diet, tryptophan will reduce dietary protein level, but not alter production performance of animals, which results in relieving the current protein deficiency and decreasing the environment pollution caused by the waste of animal production. This paper reviewed the physicochemical properties, metabolic pathways, and physiological functions of tryptophan in livestock and poultry in order to provide knowledge for scientific and reasonable application of tryptophan in animal production.

Key words: tryptophan; metabolic pathway; physiological function; livestock and poultry; regulation

*Corresponding author, professor, E-mail: nnkxf@isa.ac.cn

(责任编辑　田艳明)